

ENSAYOS DE BARCOS ATRACADOS EN MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA.

Lázaro Redondo Redondo

Antonio Baonza González

Ramón Gutiérrez Serret

*Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX,
c/ Antonio López, 81, 28026-Madrid*

RESUMEN

El presente artículo versa sobre el análisis, mediante modelo físico a escala reducida, del comportamiento de dos buques tipo, un bulkcarrier de 290 m de eslora total, y otro de 129 m. Habitualmente, antes de la realización de los ensayos de barcos atracados, se suelen realizar los ensayos de agitación, de los cuales se obtienen unos resultados menos precisos sobre la operatividad de un determinado muelle. De entre las diferentes alternativas en planta estudiadas en los ensayos de agitación, se seleccionaron tres para el análisis del comportamiento de barcos atracados. Estas alternativas se seleccionaron por ser las que presentaban mejores resultados de agitación.

El estudio se llevó a cabo a partir de ensayos en un modelo físico a escala 1:125 construido en las instalaciones que el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX tiene dedicadas a este tipo de pruebas. En él se reprodujo la batimetría de la zona y la línea de costa con las obras proyectadas. Seguidamente se aplicaron oleajes medios de periodo y dirección más influyentes en el área de estudio.

ABSTRACT

This paper focuses on the analysis by small-scale physical model, the behavior of two vessels, a bulkcarrier of 290 m in overall length, and another of 129 m.

Usually, before conducting the tests of moored ships, we perform the tests of agitation, which obtained less accurate results on the operation of a given quay. Among the different alternatives studied plant agitation trials, we selected three for the analysis of the behavior of moored ships. These alternatives were selected as the best performers of agitation. The study was conducted from tests on a 1:125 scale physical model built on the premises that the Centre for Ports and Coasts Studies of CEDEX has dedicated to this type of evidence. It reproduced the bathymetry of the area and coastline with the projected work. Waves are then applied media and address most influential period in the study area.

ÍNDICE

1	PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS	3
1.1	Ley de semejanza.	3
1.2	Efectos de escala.	4
1.3	Elección de la escala	7
1.4	Construcción del puerto a escala.	8
1.5	Construcción del buque a escala.	10
1.6	Generación de oleaje.	11
1.7	Instrumentación y equipos de medida.	13
2	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS.	15
2.1	Definición de las condiciones de ensayo.	15
2.2	Aplicación a un puerto.	16
2.3	Características de las amarras.	16
2.4	Características de las defensas.	21
2.5	Obtención de los resultados.	22
2.6	Método de cálculo de la operatividad.	23
3	RESULTADOS.	24
4	CONCLUSIONES.	26
5	BIBLIOGRAFÍA.	30

INTRODUCCIÓN.

El buque amarrado constituye un sistema dinámico de masa variable (diferentes condiciones de carga, masa añadida dependiente de la frecuencia de movimiento, etc.) unido a su entorno por una serie de ligaduras elásticas (amarras y defensas) de comportamiento no lineal y rigideces diferentes, y sometido a amortiguamientos de diverso origen (fricción con el agua o las defensas, formación de torbellinos, deformación de amarras y defensas, etc.). Por ello, su comportamiento frente a una excitación aleatoria y de espectro amplio, como es el oleaje, es muy difícil de simplificar y reducir a fórmulas sin perder fiabilidad.

A pesar del coste elevado que supone la construcción de un modelo físico, en relación con el coste de realizar una simulación matemática, en la actualidad se continúan haciendo ensayos en modelo físico.

Antes de realizar los ensayos de barcos atracados, se suelen realizar los ensayos de agitación, de los cuales se obtienen unos resultados menos precisos sobre la operatividad de un determinado muelle.

Con los ensayos de barco atracado en modelo físico se pretende cuantificar la operatividad de un atraque, es decir, el número de horas anuales en las que un buque determinado en una posición del muelle, podrá realizar sus operaciones de carga y/o descarga. En los ensayos se miden las fuerzas en las amarras, las reacciones en las defensas y los movimientos del buque.

En los ensayos de barcos atracados se miden los esfuerzos en las amarras, las reacciones en las defensas y los movimientos del buque atracado, sometido a la excitación del oleaje. Las fuerzas en amarras y defensas se miden generalmente por medio de extensómetros. Los movimientos del buque atracado se registran por métodos diversos en los distintos centros de experimentación: acelerómetros, emisores-receptores láser y sistemas ópticos.

Una vez adquiridos los datos en el modelo físico con la instrumentación mencionada se almacenan las series temporales en un ordenador para su posterior análisis y obtención de resultados.

El objeto del presente estudio ha sido el análisis, mediante modelo físico a escala reducida, del comportamiento de dos buques tipo, un bulkcarrier de 290 m de eslora total, y otro de 129 m, atracados en el muelle sur de la dársena en estudio.

En el presente documento se exponen los ensayos realizados, su metodología, los resultados obtenidos junto con el análisis de los mismos y las conclusiones derivadas del estudio.

1 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

1.1 Ley de semejanza.

Para que los resultados obtenidos en un modelo a escala puedan ser tomados como representativos de la realidad, éste debe cumplir ciertas leyes de semejanza. En el caso de un modelo hidráulico, deben tenerse en cuenta las semejanzas geométrica, cinemática y inámica:

- **Semejanza geométrica:** Permite relacionar las dimensiones del modelo con las del prototipo a través de una o varias transformaciones geométricas. $L_p = \lambda L_m$
- **Semejanza cinemática:** Añadiendo a las relaciones geométricas una escala de tiempos, permite relacionar las velocidades y aceleraciones de modelo y prototipo. $t_p = \lambda_t t_m$
- **Semejanza dinámica:** Presupone las anteriores y añade las escalas de fuerzas existentes en el fenómeno objeto de estudio. $M_p = \lambda_M M_m$

No es posible obtener semejanza total entre modelo y prototipo, por las características de los fluidos utilizados (no reproducibles a escala) y por trabajar bajo la acción de la gravedad (que lógicamente no mantiene la escala). Por ello, se recurre a emplear semejanzas parciales, en las que se reproduzcan adecuadamente las fuerzas dominantes en el fenómeno objeto de estudio, admitiendo una cierta desviación en las secundarias (efectos de escala).

En cuanto a la semejanza geométrica, en el puerto ejemplo de aplicación, se decidió utilizar una escala lineal 1:125, a la vista de las dimensiones de las instalaciones portuarias, tramos de costa a considerar en los ensayos y la superficie disponible en la nave de ensayos. No se utilizó distorsión vertical en el modelo, puesto que la zona de estudio estaba situada en profundidades suficientes como para despreciar los efectos de la capa límite.

Las fuerzas que caracterizan los procesos hidráulicos son las de inercia, presión, gravedad, viscosidad y tensión superficial. En el caso del oleaje, principal fenómeno a analizar en este caso, las predominantes son las de inercia y gravedad, que rigen la reflexión, refracción y difracción. Por ello, se recurre al empleo de la Ley de Semejanza de Froude, es decir, a la conservación del Número de Froude (F) en modelo y prototipo:

$$\left(\frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_p = \left(\frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_m$$

siendo:

v: velocidad característica del tipo de ensayo.

g: aceleración de la gravedad

L: longitud característica del tipo de ensayo.

Las escalas de tiempo y masa (λ_t y λ_M), una vez fijada la escala geométrica (λ), de acuerdo con las reglas del análisis dimensional, para este criterio de semejanza son:

$$\lambda_M = \lambda^3$$

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda}$$

Las escalas de fuerzas y velocidades son:

$$\lambda_F = \lambda^3$$

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda}$$

Si a efectos comparativos entre el modelo y el prototipo se analizan tres magnitudes significativas como son el tiempo, la velocidad y la fuerza, pueden hacerse las siguientes consideraciones:

Tiempo. De la expresión $t_p = \sqrt{\lambda} \cdot t_m$ se deduce que el tiempo discurre más rápidamente en el modelo que en el prototipo.

Velocidad. Análogamente de $v_p = \sqrt{\lambda} \cdot v_m$ se deduce que la velocidad es menor en modelo que en el prototipo.

Fuerza. De $F_p = \lambda^3 F_m$ se obtiene que la fuerza es bastante menor en el modelo que en el prototipo, de aquí la importancia de la precisión de los equipos con los que se miden las fuerzas en los ensayos a fin de que se reproduzcan con fiabilidad las que se producen en la realidad.

Las escalas utilizadas en los ensayos de buques atracados suelen ser desde 1:150 hasta 1:80, lógicamente las mismas que en los ensayos de agitación.

1.2 Efectos de escala.

1.2.1 Reproducción del oleaje.

Los factores más importantes con influencia en la bondad de los resultados obtenidos en los modelos físicos de barcos atracados son, por un lado los relacionados con las propias instalaciones y por otro, los debidos a la relación de escala elegida para la realización de los ensayos.

Es prácticamente imposible reproducir con exactitud el comportamiento del prototipo mediante los modelos físicos a escala reducida, debido a la presencia de efectos no deseados que pueden falsear los resultados en un grado tal que no se puedan extrapolar al prototipo.

Los efectos debidos a las limitaciones de las propias instalaciones, hacen referencia al tamaño del modelo, a la inevitable existencia de un contorno cerrado, al carácter unidireccional del oleaje o a la aparición de efectos no lineales en el oleaje generado debido a la utilización de medios mecánicos.

Los efectos de escala en los modelos físicos reducidos, y concretamente en los de agitación, aparecen al considerar que las fuerzas de inercia presentes en los fenómenos hidrodinámicos se equilibran, básicamente, con las fuerzas gravitatorias (semejanza de Froude), despreciando la influencia de otro tipo de fuerzas como las de viscosidad, tensión superficial, elasticidad y presión, que, aunque en menor medida, si tienen influencia en los procesos hidrodinámicos.

En los modelos físicos de agitación y barcos atracados a escala que se rigen por la ley de semejanza de Froude, los efectos de escala de las fuerzas de viscosidad y tensión superficial tienen influencia en los procesos de reflexión, transmisión y en las pérdidas de energía por fricción y por rotura de la ola. A continuación se examina cada uno de ellos, indicando su grado de influencia.

1.2.1.1 Reflexión.

Dependiendo de las circunstancias, la reflexión en el modelo puede ser mayor o menor que en el prototipo. En pendientes lisas, como por ejemplo una rampa varadero, la reflexión en el modelo es menor que en el prototipo ya que las superficies lisas son relativamente más rugosas en el modelo.

Por el contrario, en el caso de estructuras con taludes rugosos, caso de diques en talud o existencia de acantilados, el oleaje reflejado es mayor en el modelo ya que el flujo a través de los huecos está afectado por los efectos de la viscosidad, de manera que la estructura se comporta como si fuese menos porosa que en el prototipo. Esto puede resolverse incrementando el tamaño relativo de los elementos en el modelo por encima del correspondiente a la escala seleccionada.

En el contorno exterior del modelo se minimizan los efectos debidos a la reflexión del oleaje mediante el uso de amortiguadores de energía, como pueden ser mantas de fibra de coco o playas de arena muy tendidas.

Cuando las características reflejantes de una determinada estructura deban conocerse con gran precisión, por tener una influencia decisiva en el comportamiento hidrodinámico del conjunto portuario, la necesidad de una simulación correcta exige realizar ensayos específicos a escala suficientemente grande que permita que el flujo en el interior de la estructura se desarrolle en régimen turbulento. A la vista de los resultados, se toman las medidas adecuadas en el modelo para reducir la energía reflejada a los valores obtenidos en los ensayos específicos realizados para tal fin.

1.2.1.2 Transmisión

Si fuera conveniente analizar la transmisión de energía a través de algún tipo de estructura más o menos permeable presente en el modelo, habría que tener en cuenta que la energía transmitida en el modelo es inferior a la correspondiente del prototipo, si los elementos conservan la escala. La pérdida por fricción es mayor en el modelo cuando el flujo atraviesa los huecos de la estructura. Se debe, por tanto, incrementar el tamaño de los elementos en el modelo sobre el definido por la escala seleccionada en un coeficiente, K, tal que verifique:

$$\lambda = K \frac{L_p}{L_m}, \text{ siendo } K > 1$$

donde,

λ : Escala necesaria para corregir el efecto de la transmisión de energía

L_p : Longitud equivalente del elemento en prototipo

L_m : Longitud equivalente del elemento en modelo

1.2.1.3 Tensión superficial

Los efectos de escala debidos a las fuerzas de tensión superficial en un modelo de agitación pueden ser importantes bien cuando el período del oleaje es pequeño o bien si la profundidad de agua es también pequeña. Según Le Méhauté (1976), como valores límite se pueden tomar los siguientes:

Periodo, $T < 0,35$ s

Profundidad, $d < 2$ cm

Para valores del periodo y de la profundidad inferiores a éstos, se produce un amortiguamiento de la amplitud de la ola que no se da en la realidad. Asimismo, como la celeridad de la onda es función de la tensión superficial, es posible que el efecto de la refracción en el fondo no se reproduzca correctamente en el modelo bajo dichas condiciones.

1.2.1.4 Viscosidad y fricción

Este tipo de fuerzas no se reproducen adecuadamente en un modelo a escala reducida regido por el criterio de Froude al no coincidir el número de Reynolds en el modelo y en el prototipo. El oleaje se atenúa tanto por fricción interna como por fricción con el fondo debido a la viscosidad del agua. Si las distancias de recorrido son relativamente cortas este efecto se puede considerar despreciable. Es conveniente reproducir los taludes y fondos lo más lisos posibles (incluso pulidos), para evitar este tipo de efectos negativos.

En el caso de análisis de las fuerzas de rozamiento, hay que tener presente que las fuerzas necesarias para vencer la fricción son, en términos relativos, mayores en el modelo, lo que puede llegar a tener gran importancia en el estudio de la estabilidad de los elementos del manto de protección de un dique, ya que los resultados obtenidos quedarían del lado de la inseguridad.

Por otro lado, reproducir el régimen turbulento por fricción exige representar adecuadamente la rugosidad del fondo, lo que no es viable en un modelo de agitación si se hace manteniendo la escala geométrica.

En general, se puede afirmar que el efecto de la viscosidad y de la fricción en modelos físicos para estudios portuarios suele ser despreciable para las escalas y las condiciones de ensayo que más habitualmente se suelen utilizar.

1.2.1.5 Rotura de la ola

Es importante que la respuesta hidrodinámica causada por la rotura de ola en el modelo sea equivalente a la que se produce en la realidad. Sin embargo las burbujas de aire creadas durante el proceso de la rotura son relativamente mayores en el modelo debido a los efectos de la tensión superficial, lo que hace que el fenómeno no se reproduzca generalmente de forma correcta.

En la mayoría de los modelos de agitación y barcos atracados se suele evitar la rotura de ola durante el proceso de generación, para poder conservar la relación lineal entre el punto de medida de referencia (zona de generación del oleaje) y los diferentes puntos de interés seleccionados tanto en el interior como en el exterior de las instalaciones portuarias. No obstante, en determinados casos no se puede evitar que se produzca la rotura de la ola en cuyo caso habrá que analizar convenientemente el efecto producido de cara a la obtención de resultados acordes con la realidad.

Finalmente, es necesario recordar que el ingeniero debe responsabilizarse de identificar los potenciales efectos de escala en el modelo y cuantificar sus efectos en orden a conseguir unos resultados lo más próximos a la realidad como sea posible. En muchos casos, el conocimiento de datos reales permite obtener una buena calibración del modelo y de este modo es posible conocer el nivel de influencia que los efectos de escala tienen en el comportamiento del modelo.

Tendrán que verificarse siempre que se trate de estudios que requieran gran exactitud en los resultados, como por ejemplo, en aquéllos relacionados con la generación del oleaje a partir del análisis mediante ecuaciones teóricas, o bien en caso de estudios de instalaciones portuarias ya existentes, o cuando se trate de estudios de investigación con datos desconocidos que necesiten ensayos en diferentes escalas.

1.2.2 Barco atracado.

Los efectos de escala principales se concentran en los efectos de la viscosidad, y especialmente en la diferencia de flujo entre modelo y prototipo. A velocidades medias y altas, el flujo es siempre turbulento en prototipo, dada su mayor rugosidad. Por el contrario, y dado que el modelo trabaja con números de Reynolds más bajos, puede ocurrir que el flujo sea laminar en gran parte de la eslora. Ahora bien, dado que el buque atracado registra velocidades muy bajas (entre 30 y 50 veces menores que la velocidad en servicio) este efecto tiene una importancia menor si sólo se tiene en cuenta la acción del oleaje.

Las curvas de deformación de amarras y defensas no son en general lineales (deformación proporcional a la tracción o compresión), excepto en el caso de cables de acero. Las amarras de fibra presentan curvas de deformación parabólicas, mientras que las defensas muestran una gran variedad de comportamientos (parabólicas, curvas en "S" o tramo lineal-tramo cuasiplástico). Es complicado disponer en el modelo elementos que reproduzcan adecuadamente estos comportamientos, por lo que en la mayoría de los casos se utilizan flejes de respuesta lineal. Así, habrá también cierta desviación en los valores de fuerzas por efecto de la instrumentación utilizada. Las pérdidas por histéresis en los ciclos tracción-relajación de las amarras compresión-relajación de las defensas no se suelen tener en cuenta en los modelos reducidos, por lo que se obtienen recorridos algo mayores, en general.

1.3 Elección de la escala

Por su tamaño y profundidad, los puertos pueden normalmente representarse mediante modelos sin distorsión de escalas, es decir, con la misma escala geométrica en las dimensiones horizontal y vertical.

Los períodos de oleaje más utilizados, suelen ser: de 2 a 5 s para "fetch" muy corto, de 5 a 10 s para temporales locales y de 10 a 20 s para temporales generados a gran distancia, permiten evitar la distorsión vertical. Este hecho, permite simplificar el diseño del modelo y facilita en gran medida la extrapolación de los resultados.

Como ya se ha comentado, las fuerzas predominantes en los fenómenos del oleaje son las gravitatorias, mientras que las debidas a la viscosidad y a la tensión superficial son en principio despreciables frente a aquéllas. Por tanto, lo más frecuente es aplicar la Semejanza de Froude.

La escala lineal se selecciona en función de los siguientes factores:

- Utilización de una escala lo mayor posible con el fin de minimizar los efectos de escala.
- Evaluación del espacio disponible para construir el modelo en las instalaciones de ensayo.
- Dimensiones de la zona a estudiar

- Análisis de la capacidad de los equipos generadores de oleaje y los sistemas de medida.
- Número de Reynolds compatible
- Escala del barco
- Rango de parámetros del oleaje de ensayo
- Otros factores fruto de la experiencia obtenida en estudios anteriores

Los modelos grandes (escalas pequeñas) vienen limitadas por el espacio disponible y suelen suponer un coste económico elevado. Los modelos pequeños (escalas grandes) tienen el inconveniente de la aparición de efectos de escala. El valor mínimo, viene determinado por los requerimientos de las fuerzas viscosas y de tensión superficial en los modelos sin distorsión de escala.

Como ya se ha comentado, los efectos de escala más importantes se refieren a la tensión superficial en zonas de muy baja profundidad (ondas capilares), a la pérdida de altura de ola por fricción interna y fricción con el fondo y a la alteración de las características reflejantes de las estructuras portuarias. La defensa contra estas distorsiones se centra en despreciar los resultados del modelo en zonas de muy reducida profundidad, en limitar el período mínimo de oleaje y en ajustar los coeficientes de reflexión de taludes y paramentos especiales por medio de la realización de ensayos auxiliares a mayor escala.

Habitualmente, se utiliza un rango de escalas que va desde 1:50 para modelos de puertos deportivos o pesqueros hasta 1:150 para grandes puertos comerciales. Una vez que se fija la escala, debe analizarse la magnitud de los efectos de escala en las fuerzas viscosas y de capilaridad. En su caso, se incrementaría la escala o se recurriría a utilizar modelos con distorsión. El objetivo principal en estos casos, es corregir el comportamiento del modelo en áreas de profundidad limitada. La extrapolación habitual es directa, pero se circunscribe a las zonas del modelo no afectadas por efectos de escala.

Hay otros aspectos a tener en cuenta a la hora de seleccionar la escala:

- La instrumentación que se maneja es muy delicada y compleja (hilos, flejes, laser y extensómetros), por lo que interesa utilizar modelos de un tamaño suficiente como para manejarlos con la suficiente comodidad y precisión.

- Hay una dificultad en lo que se refiere a la sensibilidad de los aparatos de medida. La medida de fuerzas es el caso más destacado, ya que su escala varía con el cubo de la escala geométrica (1 tonelada a escala 1:100 se convierte en 1 gramo). Por este motivo interesa utilizar escalas grandes para medir magnitudes apreciables con precisión.

Como orientación cabe fijar un límite de escala en torno a 1:150 como máximo, con modelos de buques de eslora superior a 1 m.

En el puerto que se estudia la escala utilizada en los ensayos de buques atracados fue 1:125, lógicamente la misma que en los ensayos de agitación. La modelización se realizó de acuerdo con la Ley de semejanza de Froude, sin distorsión de escalas, ya que las fuerzas de inercia y de gravedad, en este caso, son mucho más importantes que las de otra naturaleza (tensión superficial, viscosidad, etc) en los fenómenos a reproducir.

1.4 Construcción del puerto a escala.

La definición de las dimensiones del modelo físico se calculan, una vez seleccionada la escala, teniendo en cuenta la zona objeto de estudio y la superficie adicional necesaria para la colocación de las paletas generadoras de oleaje que permita el desarrollo de éste. En este sentido, son limitaciones importantes la superficie disponible en la instalación de ensayos y la capacidad de los equipos de generación y medida de oleaje.

La construcción de los modelos tridimensionales se lleva a cabo utilizando la técnica de los alambres. Es decir, las batimétricas se reproducen con alambre de acero, y se fijan soldándolas sobre varillas verticales de longitud correspondiente a la profundidad en cuestión. Posteriormente, se rellena la zona inferior con grava hasta una pequeña distancia de la superficie, disponiendo una capa de mortero de cemento en los últimos 5 cm. Una vez alisada, reproducirá la geometría del fondo, debiendo conseguirse un buen acabado para reducir al mínimo la fricción.

Los datos de batimetría se obtienen de diversas fuentes: las cartas generales y locales, información actualizada de los puertos sobre las condiciones de dragado, o incluso, si es necesario, campañas de medición “in situ”.

Las instalaciones del puerto (espigones, diques, dársenas, etc.) se reproducen con diferentes materiales y métodos de construcción. Habitualmente se utilizan bloques o piedras de pesos y dimensiones calibradas para los diques, y los muelles se construyen con ladrillos y cemento. En determinados casos se disponen elementos desmontables que reducen drásticamente el tiempo y coste de construcción (espaldones, muelles claraboya, rampas y varaderos).

Un hecho decisivo en la técnica de modelos es la adecuada calibración de las reflexiones, que tienen lugar en condiciones muy diferentes a las de prototipo. Por ello, es necesario disponer elementos antirreflejantes en los límites del modelo, que permitan una correcta reproducción de los fenómenos influyentes en la propagación del oleaje. Estos consistirán habitualmente en mantas de fibra de coco, playas de gravilla muy tendidas, etc. Hay que tener en cuenta, además, que las ondas largas tienen condiciones de propagación diferentes a las del oleaje de corto periodo, siendo muy difícil controlar sus reflexiones, que se verán mucho menos amortiguadas. En la fotografía 1 se muestra el modelo físico terminado con el buque atracado.



Fotografía 1. Vista general del modelo físico. Muelle tipo 1 (vertical).

Asimismo, cuando el elemento reflejante sea un muelle tipo claraboya, por ejemplo es conveniente realizar ensayos bidimensionales previos para determinar la variación del coeficiente de reflexión dentro del rango de alturas y periodos esperados en el atraque. La técnica habitual es llevar a cabo ensayos a una escala mayor (1:20 ó 1:25), representativa de las condiciones del prototipo, para evaluar las condiciones reflejantes del muelle. Posteriormente, se ajustará el coeficiente de reflexión del modelo de agitación actuando sobre algún parámetro de la sección (índice de huecos, pendiente de taludes, disposición de claraboyas, etc) hasta conseguir valores semejantes a los reales.

En el modelo físico que se estudia en este artículo se reprodujeron tres tipos de muelle: muelle vertical (fotografía 1), muelle con cuenco amortiguador en el extremo sur (fotografía 2) y muelle con paramento de baja reflexión (fotografía 3). En este artículo a estos muelles se les ha denominado muelle tipo 1, 2 y 3 respectivamente.



Fotografía 2. Detalle del cuenco amortiguador



Fotografía 3. Detalle del paramento de baja reflexión

1.5 Construcción del buque a escala.

En la construcción del modelo del barco se aplican las técnicas típicas de la Ingeniería Naval. El material más utilizado es la madera, con lo que resulta sencillo reproducir con exactitud las formas del casco. La fase siguiente consiste en la calibración del desplazamiento del modelo y su distribución de pesos. Con ello se consigue reproducir el comportamiento dinámico del buque tanto a plena carga como en lastre, con un adecuado reparto de masas que da lugar a periodos de oscilación a escala.

La construcción de los buques tipo ensayados, así como el ajuste de sus parámetros dinámicos característicos (alturas metacéntricas, inercia, periodos propios de balance, arfada y cabeceo, etc.) se realiza, conforme a la ley de semejanza de Froude. Puesto que no ha lugar a tener en cuenta el efecto de fuertes corrientes, no ha sido necesario actuar sobre la rugosidad de la superficie del casco con el fin de conseguir la reproducción de los coeficientes de arrastre en el modelo a escala reducida. A continuación se describe el proceso de construcción un buque a escala.

Una vez determinado el tamaño del modelo, es necesario elegir el material del mismo. Este puede ser: madera, parafina, poliéster o metal. Los más utilizados son la madera y el poliéster.

El empleo de la madera es recomendable para el caso de modelos muy grandes y que requieran un uso continuado. La madera es más difícil de trabajar que el poliéster.

A continuación se enumeran las fases de la construcción de un modelo de madera:

- Se parte de la definición de formas, dibujando el “plano de talladora” a la escala que se va construir el modelo. Este exigirá una serie de líneas de agua que definan adecuadamente el modelo.
- Una vez dibujado este plano se procede al dibujo del “plano de cerchas”. Tiene como finalidad la definición de las denominadas “cerchas”, especie de aros de madera, de espesor de unos 2 centímetros cuya forma sigue las líneas de agua con una anchura de unos 3 centímetros.
- El siguiente paso es cortar las “cerchas” y encolarlas para tener una primera versión basta del modelo.
- La “talladora de modelos” desbastará el modelo, rebajando los escalones de las cerchas, utilizando el plano comentado en el primer apartado.

- La culminación del modelo se realizará a mano comprobando con las plantillas de cuadernas y los perfiles de proa y popa.
- Posteriormente se procede a su acabado, pintando y lijando sucesivamente hasta alcanzar el grado de rugosidad aceptable.

Una vez terminado el modelo se deberá lastrar para alcanzar los calados deseados e instrumentar de acuerdo con los ensayos que se quieran llevar a cabo.

En el estudio del nuevo puerto los buques tipo ensayados fueron dos bulkcarrier a plena carga, atracados ambos en el mismo muelle (fotografía 1). Las dimensiones de estos buques fueron las indicadas en la tabla 1.

Características	Bulkcarrier	Bulkcarrier
Eslora total (m)	290,0	129,2
Manga (m)	46,0	18,3
Desplazamiento (t)	188.784	12.387
Calado (m)	17,0	7,9

Tabla 1. Características de los buques ensayados.

1.6 Generación de oleaje.

El oleaje será, en la mayoría de los casos, la solicitud dominante en el diseño de la instalación portuaria o en el análisis de sus condiciones de explotación. Ello no quita que, en ocasiones, sean también las corrientes, la marea o el viento factores importantes a considerar. Sin embargo, la especial dificultad para reproducir adecuadamente este fenómeno natural ha dado lugar a que la mayor parte de los esfuerzos se vuelquen en obtener en los modelos reducidos oleaje que se ajuste de forma suficiente a la realidad.

Para permitir el total desarrollo del oleaje, las paletas deben situarse alejadas al menos unas 4 ó 5 longitudes de onda de la zona de medida. El oleaje se conduce desde la paleta a la zona de medida mediante el uso de pantallas de encauzamiento colocadas perpendicularmente a los frentes de ola, para mantener la dirección original de propagación y evitar las pérdidas por expansión lateral.

La información de partida, es decir, las características del oleaje que se quiere reproducir en el modelo físico (alturas, períodos, direcciones) vendrá dada habitualmente por tres posibles fuentes:

- Medidas realizadas “in situ” mediante boyas.
- Datos visuales aportados por los buques en ruta.
- Modelos de predicción.

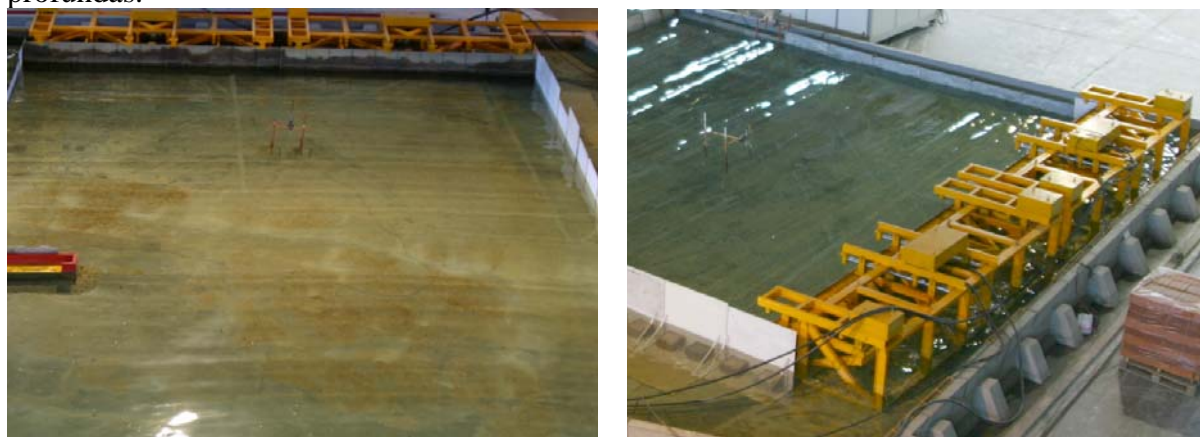
En los ensayos de barcos atracados se reproduce oleaje correspondiente al régimen medio porque se pretende determinar las condiciones de explotación del atraque o puerto en estudio.

Habitualmente se genera oleaje irregular con un espectro semejante al real, aproximado mediante la formulación JONSWAP. Este vendrá caracterizado por una altura de ola significativa, un periodo de pico y uno o más parámetros de forma.

Es necesario contar con métodos numéricos de ajuste de espectros tipo a señales reales y de síntesis de señal por suma aleatoria o filtrado, así como determinar criterios más completos de selección de parámetros.

Normalmente se utiliza una única dirección de oleaje, por lo que las olas tienen frentes de longitud igual a la anchura de la pala generadora (cresta larga).

El equipo de generación utilizado consiste en una o más palas (chapas metálicas recubiertas de fibra de coco colocadas en posición vertical) soportadas en una estructura metálica y movidas en el agua mediante un actuador. En nuestro caso el actuador, “pyston type”, da lugar a un movimiento de traslación horizontal de la paleta, lo que produce en las partículas de agua distribuciones de velocidad semejantes a las del oleaje en aguas poco profundas.



Fotografía 4. Paletas generadoras de oleaje.

En el puerto de estudio se reprodujeron oleajes ajustados a espectros JONSWAP, con las características indicadas en la tabla 2.

Dirección (aguas profundas)	Dirección reproducida en modelo	Fr (%)	K_{rs}	T_p (s)	H_s (m)	γ
WNW-NW	N-50°-W	15.9	0.87	15	4.5	3.3

Tabla 2. Características del oleaje ensayado.

Los puntos de referencia para la medida del oleaje exterior se situaron a una profundidad de 50 m en prototipo. La dirección del oleaje en aguas profundas se agrupó por sectores, resultando en el modelo físico la dirección reproducida que se muestra en la segunda columna de la tabla 2. La frecuencia de presentación, el coeficiente de transformación, el periodo de pico del espectro, la altura significativa del oleaje del espectro y su factor de apuntamiento para cada dirección, aparecen por columnas también en la tabla 2.

Las alturas de ola de referencia se eligieron de forma que fueran suficientemente representativas desde el punto de vista de la explotación del puerto, y compatibles con una adecuada generación del oleaje y medida de los movimientos de los buques en el modelo, evitándose en todo momento el descrestamiento de las olas, que pudiera ser causa de pérdidas por rotura en la zona de generación.

Para cada ataque en concreto se persiguió obtener alturas de ola semejantes con cada dirección y periodo del oleaje a fin de poder comparar de forma coherente los resultados obtenidos en cada una de las fases o alternativas estudiadas, soslayando en lo posible los efectos no lineales en el comportamiento del oleaje y en la respuesta del buque. Debe señalarse, que las alturas de ola ensayadas se encontraron dentro de rangos comparables en todos los casos.

En la figura siguiente se presenta el espectro correspondiente al oleaje ensayado, incluyendo en el teórico (JONSWAP) y el reproducido en el punto de referencia frente a las paletas generadoras.

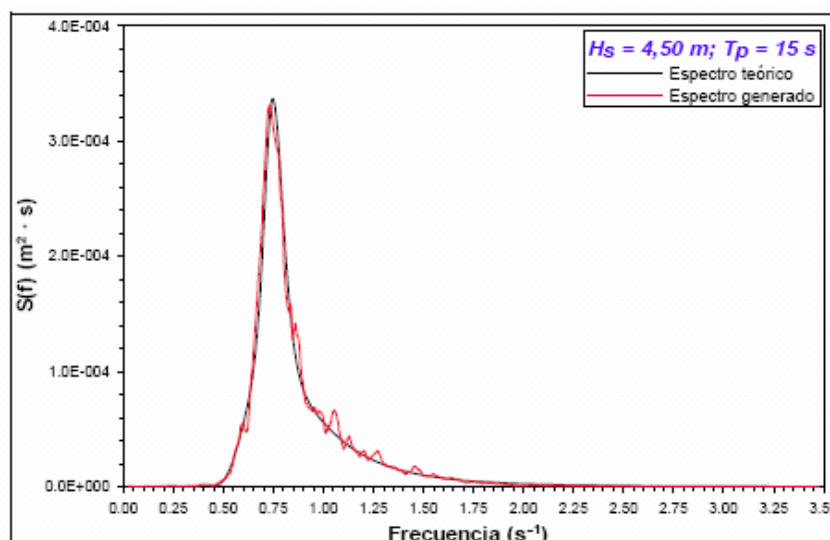


Figura 1. Espectros de oleaje. Dirección N-050-W. $H_s=4.5\text{m}$, $T_p=15\text{s}$.

1.7 Instrumentación y equipos de medida.

En los ensayos de barcos atracados se mide el oleaje generado, los movimientos del barco atracado, las reacciones en las defensas y los esfuerzos en las amarras.

Para medir la altura de ola se utilizan sondas que registran de forma continua las variaciones del nivel del agua. Existen dos tipos de sondas para medida de oleaje:

- *Sondas de resistencia*: Se basan en la medida de la resistencia de la columna de agua entre dos electrodos. La resistencia entre ambas barras, resulta ser inversamente proporcional a la altura de su parte sumergida. El sensor está constituido por dos barras conductoras de acero inoxidable dispuestas paralelamente, alimentadas con corriente alterna para evitar fenómenos de electrólisis. La linealidad del sensor depende, fundamentalmente, del paralelismo de las barras. La variación del nivel de agua provoca el cambio correspondiente de la longitud sumergida que se traduce en variación de resistencia y por consiguiente de tensión. Así pues, la medida de la tensión permite conocer, a través del adecuado factor de calibración, el nivel instantáneo del agua.

- *Sondas de capacidad*: El sensor tiene un cable, que se alimenta igual que en el caso anterior con corriente alterna. La capacidad del sensor es proporcional a la longitud sumergida del cable. Un condensador está formado por dos placas metálicas separadas, en este caso el condensador es cilíndrico, es decir disponemos dos cilindros concéntricos, cada uno de ellos conectado a un polo. El cable sumergido en el agua es el cilindro interior conectado a un polo, el agua que rodea a este cable es el cilindro exterior que está conectado al otro polo, el de masa, mediante una barra metálica que hace de soporte. Así se tiene un condensador de longitud, la misma que la longitud de cable sumergido.

En el CEDEX, la medición de los movimientos de un barco atracado realiza con uno de estos dos sistemas: emisores-receptores láser, cámaras de infrarrojos.

Los *emisores-receptores láser* están colocados sobre un soporte y emiten un haz que es reflejado por unas superficies dispuestas en la cubierta del buque. Producen una tensión de salida proporcional al recorrido del punto de la cubierta. Cada sensor permite medir los recorridos de un punto en una dirección. Combinando varios puntos, pueden obtenerse los giros y traslaciones elementales del buque en los tres ejes de referencia (vaivén, deriva, alzada, guiñada, cabeceo y balance).

El sistema de medida de movimientos basado en las *cámaras de infrarrojos* consiste en un número de cámaras, de 2 a 4, enfocando al barco, en el que previamente se han colocado los marcadores (cuatro esferas reflectantes). Cada una de las cámaras emite un haz de luz infrarroja, que es reflejado por cada uno de los marcadores y recibido de nuevo por las cámaras. Con una cámara se obtiene el movimiento del barco en un plano, combinando dos cámaras se obtiene el movimiento del barco en tridimensional. Como resultado se obtienen seis series temporales, cada una de ellas representando cada uno de los movimientos (vaivén, deriva, guiñada, alzada, cabeceo y balance) del barco.

Las fuerzas en amarras y defensas se miden generalmente por medio de *extensómetros*, estos consisten en láminas muy delgadas pegadas sobre una pletina metálica. Al deformarse la pletina por efecto de una flexión, las bandas se alargan o contraen, variando su resistencia. Alimentadas por corriente continua, generan una tensión de salida proporcional al grado de flexión, es decir, a la fuerza ejercida sobre la amarra o la defensa.

Las características de las amarras y de las defensas se modelizan en base a las propiedades elásticas de varillas y pletinas de acero respectivamente. La unión de las amarras a sus puntos correspondientes en las cubiertas de los modelos de los buques se lleva a cabo por medio de hilos inextensibles. El contacto entre el modelo a escala del buque y las pletinas de acero que reproducen las defensas se produce en un tetón de metacrilato adherido en una sección concreta de cada pletina.

Las curvas de alargamiento de las amarras y de compresión de las defensas se corrigen considerando características de deformación lineales, que se reproducen mediante varillas y pletinas de acero respectivamente.

En la fotografía siguiente se muestra un ensayo con parte de la instrumentación mencionada.



Fotografía 5. Buque con la instrumentación de medida.

La señal recogida por los sensores es acondicionada y amplificada para su transmisión, utilizándose acondicionadores de señal específicos para cada tipo de sensor.

Los distintos captores se conectan a un ordenador de toma de datos a través de sus correspondientes acondicionadores de señal (amplificadores, conversores A/D, etc), permitiendo el registro y posterior tratamiento de las series temporales de los valores de las diferentes variables a medir (altura de ola, tensiones de las amarras, esfuerzos de las defensas y movimientos de los buques). Se realiza una conversión de señales analógicas a valores digitales, que permite el almacenamiento de series de valores en el disco de un ordenador. De este modo, el tratamiento posterior de las medidas resulta mucho más eficiente, dado el gran número de canales utilizados (hasta ocho canales de movimientos, hasta de seis amarras y varias defensas), que haría muy engorroso el tratamiento por otros medios. En la siguiente figura se muestra el proceso descrito.

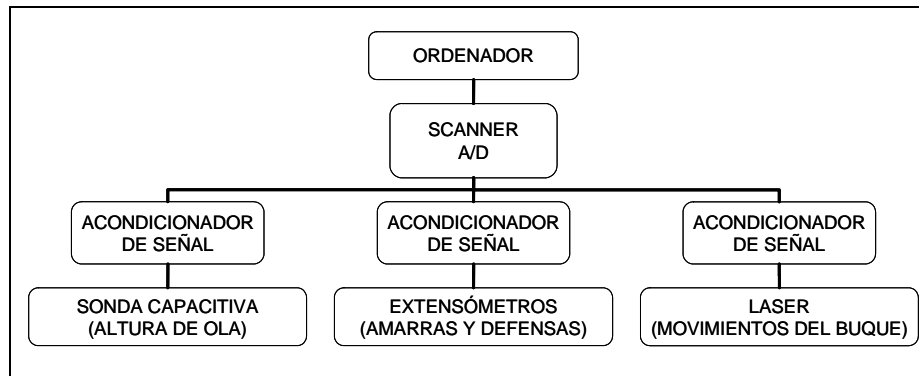


Figura 2. Adquisición y registro de datos.

2 METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS.

El objetivo principal de los ensayos de comportamiento de buques atracados es poder estimar el rango de las tensiones en las amarras y de las reacciones en las defensas, así como las amplitudes de los movimientos de los buques, con el fin de orientar sobre las condiciones de explotación y la operatividad de los atraques en estudio.

El buque atracado se considera como un sistema oscilatorio, cuyos movimientos están restringidos por la actuación del equipo de amarre y las defensas, sometido a una excitación exterior impuesta por el oleaje, la corriente y el viento.

2.1 Definición de las condiciones de ensayo.

Previo a la adquisición de datos, se lleva a cabo el análisis de una gran cantidad de información y la selección de diversos datos fundamentales para la planificación de los ensayos:

Puerto:

- Posiciones de atraque a estudiar.
- Tipo de buques.
- Disposición de los bolardos.
- Fases y/o alternativas constructivas.

Buque:

- Dimensiones y clase.
- Condiciones de carga (lastre, plena carga).
- Equipo de amarre.

Amarras:

Defensas:

- Posiciones en el muelle.
- Tipo de defensas.
- Rigidez y curva de deformación.
- Coeficiente de fricción con el casco.

Condiciones:

- Niveles de marea.
- Oleajes.
- Corrientes.
- Viento.

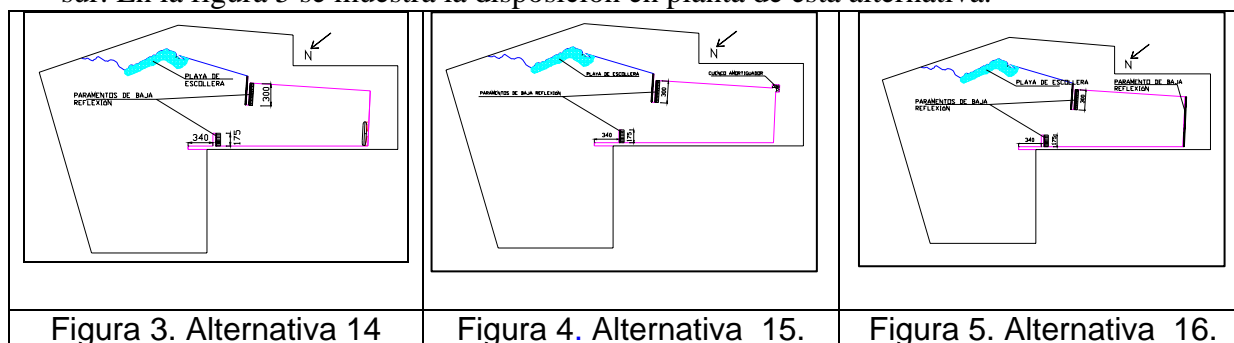
- Distribución geométrica.
- Materiales utilizados.
- Diámetros y longitudes.

2.2 Aplicación a un puerto.

El estudio se ha llevado a cabo en un modelo físico a escala 1:125, construido en las instalaciones que el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX tiene dedicadas a este tipo de pruebas. En él se reprodujeron la batimetría de la zona, la línea de costa y las obras proyectadas para el nuevo puerto, generándose los oleajes medios de los periodos y direcciones más influyentes en el área de estudio.

En los ensayos de agitación se han estudiado distintas alternativas del futuro puerto adicionales a la anteproyectada por la Autoridad Portuaria. En barcos atracados se ensayaron las tres alternativas que mejor funcionaron, son las siguientes:

- **Alternativa 14.** Planta de proyecto con martillo a una distancia del morro de 340 m, con protección de escollera en el lado interior del martillo y del contradique, con amortiguación en el lado exterior del contradique en el tramo final del encauzamiento. En la figura 3 se muestra la disposición en planta de esta alternativa.
- **Alternativa 15.** Igual que la alternativa 14, añadiendo un cuenco amortiguador en el extremo E del muelle sur. Además en esta alternativa se han ensayado tres configuraciones del sistema de amarre de los buques (tipos de amarres, distribución de amarres en planta y defensas). En la figura 4 se muestra la disposición en planta de esta alternativa
- **Alternativa 16:** Igual que la alternativa 14, con paramento de baja reflexión en el muelle sur. En la figura 5 se muestra la disposición en planta de esta alternativa.



Hasta el momento se ha definido el oleaje, el puerto, el barco y el muelle, falta por definir las amarres y las defensas.

2.3 Características de las amarres.

Para el bulkcarrier de menor eslora, se adoptó la misma geometría de amarre en todos los ensayos, disponiendo las líneas conforme a su equipo específico y a la situación de los bolardos proyectada en los muelles.

Sin embargo para el bulkcarrier de mayor eslora, debido a los resultados obtenidos, se adoptaron distintas configuraciones de ensayo, con el fin de mejorar los resultados.

Las figuras 6 y 7 muestran un esquema de la distribución de las líneas de amarre, con la disposición considerada en cada caso.

La rigidez de las amarres se modeliza, en los ensayos, a base de varillas de acero calibradas uniendo sus extremos a puntos concretos de la cubierta de los buques por medio de hilos inextensibles en el modelo. El valor de la rigidez se ajusta controlando la longitud de la varilla, de forma que la deflexión producida en su extremo, en combinación con las características mecánicas del material, reproduzcan a la escala adoptada, la rigidez de la amarra.

A continuación se detallan las características de estos sistemas de amarre y su modelización para cada uno de los buques tipo ensayados.

2.3.1 Bulkcarrier de 290 M

El bulkcarrier de 290 m de eslora fue ensayado en las alternativas 14, 15 y 16. En la alternativa 14 se ensayó con el sistema de amarre 1. En la alternativa 15 se ensayó con los sistemas de amarre 1, 2 y 3. y en la alternativa 16 se ensayó con el sistema de amarre 3.

Estos sistemas de amarre se definen a continuación, básicamente las diferencias son: variación de la longitud de las amarras, cambio del tipo de amarra y cambio de las defensas.

2.3.1.1 Configuración de amarre del bulkcarrier de 290 m. Sistema de amarre 1.

En el sistema de amarre 1, la configuración de amarre reproducida en los ensayos fue de veinte líneas, distribuidas como sigue: 4 Largos a proa y 4 a popa de polipropileno, 3 Traveses a proa y 3 a popa de polipropileno y 3 Springs a proa y 3 a popa de polipropileno. Para los largos, traveses y springs se tomaron amarras de polipropileno de mena 12'' (97 mm de diámetro) cuyas características resistentes, de acuerdo con los gráficos de Christiani & Nielsen son:

$$\begin{aligned} \text{Carga de rotura (P}_r\text{):} & \quad P_r = 102.1 \text{ t.} \\ \text{Carga de trabajo (P}_t\text{):} & \quad P_t = \lambda * P_r = 0.67 * 102.1 = 68.4 \text{ t.} \\ \text{Alargamiento a P}_t \text{ (}\epsilon_t\text{):} & \quad \epsilon_t = 11 \% \\ \text{Rigidez unitaria (K):} & \quad K = \frac{P_t}{\epsilon_t \cdot L} = \frac{68.4}{0.11 \cdot L} = \frac{621.81}{L} \quad \frac{t}{m} \end{aligned}$$

El coeficiente de minoración λ se ha tomado 0.67, siguiendo recomendaciones de la British Ship Research Association (B.S.R.A.) para cabos de polipropileno.

Aplicando las expresiones de las rigideces obtenidas a las amarras consideradas, una vez estimadas sus longitudes, tanto en el exterior del buque como a bordo, resultan los valores indicados en la tabla 3.

Amarra	Número de líneas	L _{tot} por línea (m)	Rigidez en prototipo (t/m)	Rigidez conseguida en modelo (t/m)	Desviación* (%)
Largo PR	4	61.3	40.6	25.76	-0.92
Través PR	3	26	71.8	46.17	0.59
Spring PR	3	74	25.2	16.37	1.68
Spring PP	3	67.1	27.8	17.77	-0.17
Través PP	3	24.9	74.9	47.74	-0.54
Largo PP	4	60.9	40.8	26.51	1.57

Tabla 3. Rigidez de las amarras en el bulkcarrier de 290 m. Sistema de amarre 1.

2.3.1.2 Configuración de amarre del bulkcarrier de 290 m. Sistema de amarre 2.

En el sistema de amarre 2, la configuración de amarre reproducida en los ensayos fue de veintidós líneas, distribuidas de la siguiente forma: 4 Largos a proa y 4 a popa de

* Diferencia en % entre el valor teórico, una vez aplicada la escala y el real conseguido en el modelo.

polipropileno, 3 Traveses a proa y 3 a popa de calabrote y 4 Springs a proa y 4 a popa de calabrote.

Para los **largos** se tomaron amarras de polipropileno de mena 12'' con las mismas características que aparecen en el apartado anterior.

Para los **traveses y los springs** se tomaron calabrotes formados por cable de acero de 48 mm de diámetro y fibra de mena 12'' (97 mm de diámetro) cuyas características resistentes, de acuerdo con los gráficos de Christiani & Nielsen (figura 4) para cabos constituidos a base de estos materiales con los grosores anteriormente indicados son:

Cable de acero de 48 mm de diámetro.

Carga de rotura (P_r): $P_r = 115.20 \text{ t.}$

Carga de trabajo (P_t): $P_t = \lambda * P_r = 0.55 * 115.20 = 63.4 \text{ t.}$

Alargamiento a P_t (ϵ_t): $\epsilon_t = 0.7\%$

Rigidez unitaria (K): $K = \frac{P_t}{\epsilon_t \cdot L} = \frac{63.4}{0.007 \cdot L} = \frac{9.051,7}{L} \frac{t}{m}$

Respecto al coeficiente de seguridad tomado $\lambda = 0.55$ para el cable de acero y $\lambda = 0.67$ para los cabos de fibra, siguiendo las recomendaciones de la B.S.R.A.

Teniendo en cuenta que los dos materiales tienen características elásticas muy diferentes, la rigidez de la amarra tipo calabrote constituida por tramos de polipropileno-acero-polipropileno se calcula para una carga de trabajo igual a la menor de las correspondientes a los dos materiales.

Al ser cabos conectados en serie, la rigidez total K se obtendrá de:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_p}, \text{ siendo, } \frac{1}{K} = \frac{63.4}{0.007L_a + 0.10L_p}$$

Aplicando este calculo a las amarras consideradas, resultan los valores que aparecen en la tabla 4

Amarra	Número de líneas	$L_{\text{tot por línea (m)}}$	$L_{\text{polipro (m)}}$	$L_{\text{acero (m)}}$	Rigidez en prototipo (t/m)	Rigidez conseguida en modelo (t/m)	Desviación* (%)
Largo PR	4	61.3	61.3	0	41.7	26.58	-0.45
Través PR	3	26	10	16	172.5	110.4	-1.76
Spring PR	4	74	10	64	176.3	112.8	-1.12
Spring PP	4	67.1	10	57.1	182.4	116.7	-0.65
Través PP	3	25	10	15	173.6	111.1	0.91
Largo PP	4	60.9	60.9	0	42.0	26.9	-1.78

Tabla 4. Rigidez de las amarras en el bulkcarrier de 290 m. Alternativa 15 con sistema de amarre 2

2.3.1.3 Configuración de amarre del bulkcarrier de 290 m. Sistema de amarre 3.

En el sistema de amarre 3, la configuración de amarre reproducida en los ensayos fue de veinticuatro líneas, distribuidas como sigue: 4 Largos a proa y 4 a popa de polipropileno, 5 Traveses a proa y 5 a popa de calabrote y 3 Springs a proa y 3 a popa de calabrote.

* Diferencia en % entre el valor teórico, una vez aplicada la escala y el real conseguido en el modelo.

Para los **largos** se tomaron amarras de polipropileno de mena 12'' (97 mm de diámetro) cuyas características resistentes se han dado en los apartados precedentes.

Para los **traveses y los springs** se tomaron calabrotes formados por cable de acero de (48 mm de diámetro) y fibra de mena 12'' (97 mm de diámetro) cuyas características resistentes, de acuerdo con los gráficos de Christiani & Nielsen se han dado en el apartado anterior.

Teniendo en cuenta que los dos materiales tienen características elásticas muy diferentes, la rigidez de la amarra calabrote constituida por tramos de polipropileno-acero-polipropileno se calcula para una carga de trabajo igual a la menor de las correspondientes a los dos materiales. Como se ha dicho en el apartado anterior, al ser cabos conectados en serie, la rigidez total K se obtendrá de:

$$\frac{1}{K} = \frac{63.4}{0.007L_a + 0.10L_p}$$

Aplicando este calculo a las amarras consideradas, resultan los valores que aparecen en la tabla 5

Amarra	Número de líneas	L _{tot por línea} (m)	L _{polipro} (m)	L _{acero} (m)	Rigidez en prototipo (t/m)	Rigidez conseguida en modelo (t/m)	Desviación* (%)
Largo PR	4	61.3	61.3	0	41.7	26.58	-0.45
Través PR	5	26	10	16	287.5	185.87	1.02
Spring PR	3	74	10	64	132.2	84.89	0.34
Spring PP	3	67.1	10	57.1	136.8	88.38	1.01
Través PP	5	25	10	15	289.3	185.87	0.36
Largo PP	4	60.9	60.9	0	42.0	26.42	-1.78

Tabla 5. Rigidez de las amarras en el bulkcarrier de 290 m. Alternativa 15 con sistema de amarre 3.

2.3.2 Bulkcarrier de 129 m

El bulkcarrier de 129 m de eslora fue ensayado únicamente en las alternativas 14 y 15 con defensas tipo Prosertec SC 3000 H calidad B, en el mismo ataque con la misma configuración de amarre.

En ambas alternativas la configuración de amarre reproducida en los ensayos fue de veinte líneas, distribuidas de la forma siguiente: 4 Largos a proa y 4 a popa de polipropileno, 3 Traveses a proa y 3 a popa de cable de acero y polipropileno y 3 Springs a proa y 3 a popa de cable de acero y polipropileno.

Para los **largos** se tomaron amarras de polipropileno de mena 8'' (64 mm de diámetro) cuyas características resistentes, de acuerdo con los gráficos de Christiani & Nielsen son:

$$\begin{aligned} \text{Carga de rotura (P}_r\text{):} & P_r = 46.7 \text{ t.} \\ \text{Carga de trabajo (P}_t\text{):} & P_t = \lambda * P_r = 0.67 * 46.7 = 31.29 \text{ t.} \\ \text{Alargamiento a P}_t \text{ (}\epsilon_t\text{):} & \epsilon_t = 11 \% \\ \text{Rigidez unitaria (K):} & K = \frac{P_t}{\epsilon_t \cdot L} = \frac{31.29}{0.11 \cdot L} = \frac{284.45}{L} \quad \frac{t}{m} \end{aligned}$$

* Diferencia en % entre el valor teórico, una vez aplicada la escala y el real conseguido en el modelo.

Para los **traveses y los springs** se tomaron calabrotes formados por cable de acero de (32 mm de diámetro) y fibra de mena 8'' (64 mm de diámetro) cuyas características resistentes, de acuerdo con los gráficos de Christiani & Nielsen para cabos constituidos a base de estos materiales con los grosores anteriormente indicados son:

Cable de acero de 32 mm de diámetro.

Carga de rotura (P_r): $P_r = 51.2$ t.

Carga de trabajo (P_t): $P_t = \lambda * P_r = 0.55 * 51.2 = 28.2$ t.

Alargamiento a P_t (ε_t): $\varepsilon_t = 0.7\%$

Rigidez unitaria (K):
$$K = \frac{P_t}{\varepsilon_t \cdot L} = \frac{28.2}{0.007 \cdot L} = \frac{4.024,4}{L} \quad \frac{t}{m}$$

Polipropileno mena de 8''.

Carga de rotura (P_r): $P_r = 46.7$ t.

Carga de trabajo (P_t): $P_t = \lambda * P_r = 0.67 * 46.7 = 31.29$ t.

Alargamiento a P_t (ε_t): $\varepsilon_t = 11\%$

Rigidez unitaria (K):
$$K = \frac{P_t}{\varepsilon_t \cdot L} = \frac{31.29}{0.11 \cdot L} = \frac{284.45}{L} \quad \frac{t}{m}$$

Respecto al coeficiente de seguridad tomado $\lambda = 0.55$ para el cable de acero y $\lambda = 0.67$ para los cabos de fibra, siguiendo las recomendaciones de la B.S.R.A.

Teniendo en cuenta que los dos materiales tienen características elásticas muy diferentes, la rigidez de la amarra tipo calabrote constituida por tramos de polipropileno-acero-polipropileno se calcula para una carga de trabajo igual a la menor de las correspondientes a los dos materiales.

Al ser cabos conectados en serie, la rigidez total K se obtendrá de:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_p}, \text{ siendo, } \frac{1}{K} = \frac{28.2}{0.007L_a + 0.10L_p}$$

Aplicando este calculo a las amarras consideradas, resultan los valores que aparecen en la tabla 6

Amarra	Número de líneas	L_{tot} por línea (m)	$L_{polipro}$ (m)	L_{acero} (m)	Rigidez en prototipo (t/m)	Rigidez conseguida en modelo (t/m)	Desviación* (%)
Largo PR	4	50.2	50.2	0	22.7	22.5	-0.88
Través PR	3	10	5	5	159.5	159.1	-0.25
Spring PR	4	43	10	33	92.3	92.5	0.22

* Diferencia en % entre el valor teórico, una vez aplicada la escala y el real conseguido en el modelo.

Spring PP	4	41	10	31	93.4	93.7	0.32
Través PP	3	9	5	4	161.6	161.2	-0.25
Largo PP	4	50.3	50.3	0	22.6	22.3	-1.33

Tabla 6. Rigidez de las amarras en el bulkcarrier de 129 m.

2.4 Características de las defensas.

Para el estudio de las reacciones en las defensas, se mantuvo la geometría y las características de los planos de proyecto suministrados por la A.P. En todos los atraques la separación entre las defensas fue de 25 m.

La modelización de las defensas se realizó, como es habitual, a base de pletinas de acero inoxidable a las que se adhiere un tetón de metacrilato en la zona de contacto con el modelo del buque. El tetón de metacrilato se fija a lo largo de la pletina en una sección tal que la deflexión producida en la misma, en combinación con las características mecánicas del material, ajustara a la escala adoptada, la rigidez de la defensa. En este caso, por cada t/m de rigidez en el prototipo se tiene 0.64 gr/cm de rigidez en el modelo (escala 1:125). En base a esta equivalencia se consiguieron los valores reflejados en la tabla 7.

2.4.1 Defensas en los atraques ensayados.

2.4.1.1 Bulkcarrier de 290 m de eslora.

En este atraque se ensayaron defensas HZ 1700-L2000 y PROSERTEC SC3000 H calidad B.

Las defensas están alineadas con los bolardos y la separación entre ellas es de 25 m. Sus dimensiones y características principales se exponen en la tabla 7 y en la tabla 9.

Las defensas HZ 1700-L2000 se colocaron de dos en dos.

Defensas	Carga de trabajo (t)	Deformación nominal (cm)	Rigidez prototipo (t/m)	Rigidez modelo (g/cm)
HZ 1700-L2000	313	89.25	701.4	448.9

Tabla 7. Características de las defensas con el sistema de amarre 1.

La rigidez unitaria ($K_{unitaria}$) de estas defensas, se calcula conforme a la curva de deformación dada por el fabricante:

$$K_{unitaria} = \frac{F_{unitaria}}{L} = \frac{313t}{0.8925} = 350.7 \quad t/m$$

$$K_{unitaria} = 2 * 350.7 = 701.4 \quad t/m$$

En el modelo se consiguieron los valores que se muestran en la tabla 8.

	Rigidez conseguida en modelo (g/cm)	Desviación (%)*
Defensa 1	444.44	-0.99
Defensa 2	443.66	-1.17
Defensa 3	434.07	-3.30
Defensa 4	455.79	1.53
Defensa 5	450.05	0.26
Defensa 6	454.96	1.35

Defensa 7	453.51	1.03
------------------	--------	------

Tabla 8. Rigidez en modelo de las defensas. Sistema de amarre 1.

Las defensas PROSERTEC SC 3000 H calidad B, se definen a continuación. Sus dimensiones y características principales se exponen en la tabla 9.

Defensas	Carga de trabajo (t)	Deformación nominal (cm)	Rigidez prototipo (t/m)	Rigidez modelo (g/cm)
PROSERTEC SC 3000 H	784.1	150	522.7	334.50

Tabla 9. Características de las defensas con los sistemas de amarre 2 y 3.

La rigidez unitaria ($K_{unitaria}$) de estas defensas, se calcula conforme a la curva de deformación dada por el fabricante:

$$K_{unitaria} = \frac{F_{unitaria}}{L} = \frac{784.1t}{1.50m} = 522.74 \quad t/m$$

En el modelo se consiguieron los valores que se muestran en la tabla 10.

	Rigidez conseguida en modelo (g/cm)	Desviación (%) *
Defensa 1	342.46	2.38
Defensa 2	345.30	3.23
Defensa 3	339.21	1.41
Defensa 4	342.89	-2.87
Defensa 5	340.83	1.89
Defensa 6	342.46	2.38
Defensa 7	348.43	4.16

Tabla 10. Rigidez en modelo de las defensas con los sistemas de amarre 2 y 3.

2.4.1.2 *Bulkcarrier de 129 m de eslora.*

En este atraque únicamente se ensayo con las defensas PROSERTEC. Estas se definen a continuación. Sus dimensiones y características principales son las que se han dado en el apartado anterior (tablas 9 y 10).

2.5 Obtención de los resultados.

El análisis de los datos medidos en los ensayos tiene por objeto, en una primera etapa, determinar la relación entre las alturas de ola significativa H_s en el exterior del puerto (punto de referencia cercano a la paleta) con los valores de los movimientos de los buques y los esfuerzos en las amarras y en las defensas.

Para ello, en primer lugar, se determinan los siguientes valores:

- El **valor significativo** de los movimientos o de las fuerzas medidas en el ensayo, definido como el valor medio del tercio superior de los movimientos del buque o de las fuerzas en las amarras y en las defensas obtenido de los registros temporales de cada variable para ese

* Diferencia en % entre el valor teórico, una vez aplicada la escala y el real conseguido en el modelo.

ensayo en concreto.

- El **valor máximo** de los movimientos o de las fuerzas, correspondiente a una duración de ocho horas en prototipo.
- El **valor máximo** de los movimientos o de las fuerzas **extrapolado a 1.000 movimientos**, el cual integra los resultados de todo el ensayo y resulta ser el dato más representativo.
- El **periodo medio** de los movimientos o de las fuerzas.

En segundo lugar, a partir de los valores máximos extrapolados a 1.000 olas, mediante ajuste logarítmico, se calculan los máximos movimientos y fuerzas en amarras y defensas en un período de 8 horas de actuación del oleaje. Se considera un período de 8 horas como duración continuada de las operaciones de transferencia de carga.

El ajuste logarítmico se basa en la distribución de Rayleigh. Esta metodología está ampliamente contrastada y figura en diversas publicaciones de reconocido prestigio en la materia, de entre las que cabe destacar las aportaciones de Russell 1975 y Lundgren 1976. Estos autores proponen una relación cuadrática entre los valores de los desplazamientos o de las fuerzas y el logaritmo de su probabilidad de presentación, de acuerdo con la formulación:

$$-\log P = A \cdot X^2 + B, \text{ donde:}$$

P = probabilidad de presentación (1/nº movimientos en 8 h ó 1/nº períodos de fuerzas en 8 h).

X = magnitud considerada (movimiento o fuerza).

A, B = parámetros de ajuste.

Del análisis de los parámetros A y B del ajuste logarítmico como los valores máximos esperables en 8 horas y el número de movimientos (o fuerzas) previsibles, se puede apreciar que la calidad del ajuste logarítmico obtenido de los distintos ensayos es alta, especialmente en lo relativo a los movimientos del buque, en los que se alcanzan coeficientes de correlación superiores a 0.90 en la mayoría de los casos.

En tercer lugar, una vez conocidos los valores máximos (de los movimientos o de las fuerzas) esperables en 8 horas de oleaje de cada una de las características ensayadas, se obtiene la relación entre la altura significativa del oleaje en el punto de referencia (exterior del puerto) H_s y la amplitud máxima del movimiento o la máxima fuerza en las amarras y en las defensas para cada buque, configuración en planta y dirección del oleaje.

Para ello, de acuerdo con lo habitual en la materia, se adopta una aproximación lineal para relacionar estas dos magnitudes:

Amplitud máxima movimiento o Fuerza máxima en 8 h = P * H_s + Q, Siendo:

H_s = Altura significativa del oleaje.

P, Q = Parámetros de ajuste.

Los coeficientes P y Q, obtenidos para cada variable en cada una de las situaciones ensayadas, permiten relacionar las condiciones de estancia del buque atracado con las características del oleaje exterior. En este sentido, para obtener valores comparables, se han calculado (para los dos buques analizados) las amplitudes máximas de los movimientos y de las fuerzas máximas de las amarras y de las defensas para oleajes 4.5 metros de altura significativa, actuando durante 8 horas continuadas.

Los resultados de los ensayos confirman la validez de la relación lineal entre la altura significativa del oleaje y las diferentes variables registradas, en el rango de alturas y periodos de los oleajes ensayados. Posteriormente, como resultado de todo el proceso descrito y según se detalla en el apartado siguiente, se determinan las alturas de ola significativa admisible en el punto de referencia (exterior del puerto) H_{sadm} , con las que se alcanzan las amplitudes máximas admisibles de los movimientos del buque y los esfuerzos admisibles (cargas de trabajo) en las amarras y en las defensas y, a su vez la operatividad de cada uno de los buques tipo en sus atraques respectivos.

2.6 Método de cálculo de la operatividad.

La determinación de la operatividad de los muelles se realiza, de acuerdo con los resultados de los ensayos, siguiendo el método que a continuación se expone:

En primer lugar, se fijan los valores máximos admisibles para los movimientos del buque a efectos de explotación del atraque y las fuerzas máximas admisibles en las amarras y en las

defensas.

Los criterios para determinar las amplitudes admisibles de los movimientos de los buques depende, entre otros factores, del tipo de buque, de la mercancía y de los medios de carga y descarga disponibles. En la tabla 11 se presentan los valores utilizados en este trabajo, basándose fundamentalmente en los establecidos por el Grupo de Trabajo nº 24 de la Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) en su Informe Final de 1995, para diferentes tipos de buques:

Buque	Vaivén (m)	Deriva (m)	Guiñada (°)	Alteada((m)	Cabeceo (°)	Balance (°)
BULKCARRIER	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	6.0

Tabla 11. Movimientos admisibles en el atraque para la carga-descarga.

En cuanto a las fuerzas admisibles en las amarras y en las defensas, se adoptan los valores de sus respectivas cargas de trabajo, las cuales, determinadas en los apartados anteriores, se resumen en la tabla 12.

Buque	Amarras	Defensas
BULKCARRIER 290	68.4 t	313 t
BULKCARRIER 129	28.2 t	784 t

Tabla 12. Fuerzas admisibles en las amarras y en las defensas.

Posteriormente los límites anteriores se interpretan desde un punto de vista estadístico, asociando los fenómenos -movimientos y esfuerzos- a las frecuencias de excedencia del oleaje que los provoca, de acuerdo con los datos del correspondiente estudio de Clima Marítimo, resultando así las relaciones:

Altura significativa del oleaje (H_s) - amplitud admisible del movimiento

Altura significativa del oleaje (H_s) - fuerza admisible

que permiten estimar los máximos de las amplitudes de los movimientos y de las fuerzas esperables en 8 horas de oleaje continuado determinadas según se ha expuesto. Procediendo en sentido contrario, a partir de los valores umbrales de referencia puede obtenerse la altura de ola significativa límite correspondiente al valor admisible de cada movimiento o de cada fuerza, bien sea la tensión en las amarras o la reacción de las defensas.

De esta forma, se detecta el movimiento o la fuerza que daría lugar a la suspensión de la operación de carga/descarga y su altura de ola límite admisible.

Combinando este resultado con el régimen direccional del oleaje, y extrapolando mediante una distribución de Weibull, puede calcularse un índice de operatividad -horas/año o días/año-, en que los movimientos o fuerzas superan la amplitud admisible y durante los cuales no puede desarrollarse la transferencia de carga a pleno rendimiento.

En consecuencia, puede compararse la bondad de cada configuración analizada en términos de operatividad. En todo caso, no deben olvidarse las aproximaciones y simplificaciones asumidas, por lo que los índices deben tomarse como valores orientativos de lo que puede ocurrir en la realidad.

3 RESULTADOS.

Como resultado del proceso descrito, en la tabla 13 se muestran las alturas de ola significativa límites en el exterior del puerto en el punto de referencia, a una profundidad de 50 m, que

producen las cargas de trabajo de las amarras y de las defensas o las amplitudes máximas admisibles correspondientes a cada movimiento. Observándose que la H_s más limitativa (valores menores) resultaron para el movimiento de deriva. Las fuerzas en amarras y las reacciones en defensas proporcionaban H_s más elevadas.

BARCO	DIR	ALTERNATIVA-SIST. AMARRE	TIPO DE MUELLE*	Vai.	Der.	Gui.	Alt.	Cab.	Bal.
BULK-290	N-50°-W	14-1	1	3.9	0.6	>10	6.6	>10	6.2
		15-1	2	5.9	1.9	9.7	6.2	>10	7.1
		15-2	2	5.8	3.4	9.4	6.3	>10	2.8
		15-3	2	4.6	2.1	8.5	>10	9.7	2.8
		16-2	3	5.1	0.6	8.3	9.4	>10	4.9
BULK-129		14	1	5.3	4.2	>10	>10	5.9	4.6
		15	2	5.0	3.5	>10	>10	5.4	4.2

Tabla 13. Alturas de ola significativa límite (m) para cada movimiento o fuerza.

*Tipo 1: muelle vertical, Tipo 2: muelle con cuenco amortiguador, Tipo 3: muelle con paramento de baja reflexión

Para la estimación de la inoperatividad de los atraques se parte de la altura de ola significativa admisible a la profundidad de referencia de 50 m y se calcula su equivalente en aguas profundas indefinida por medio del coeficiente de transformación expuesto en la tabla 14.

Dirección en alta mar	Dirección reproducida	Frec. Anual de presentación	Coef. de transfor. Krs	Función de excedencia (Weibull)
WNW+NW	N-50°-W	0.159	0.87	$prob(H_s) = \exp \left[- \left(\frac{H_s}{0.87 \cdot 3239} \right)^{2.303} \right]$

Tabla 14. Funciones de excedencia de los oleajes objeto de estudio.

Seguidamente, en la tabla 16, figura para la dirección de oleaje estudiada, la altura de ola significativa admisible (la menor de las indicadas en la tabla 13 para cada ensayo) y su correspondiente tiempo de excedencia en días/año, calculado a partir de las distribución de Weibull que se muestra en la tabla 15.

BARCO	DIR ^a .	ALT ^b .	MUELLE	HS	Movimiento	Inoperatividad Días/Año
BULK_290	N-50°-W	14	1	0.7	DERIVA	56.1
		15-1	2	1.9	DERIVA	38.5
		15-2	2	2.8	BALANCE	21.2
		15-3	2	2.1	DERIVA	35.8
		16	3	0.6	DERIVA	56.6
BULK_129		14	1	4.2	DERIVA	4.7
		15	1	3.5	DERIVA	10.7

Tabla 15. Variables críticas y su excedencia.

En las tablas siguientes 17, 18 y 19 se exponen las amplitudes de los movimientos expresados en metros o grados, las fuerzas en las amarras y las reacciones en las defensas expresadas en toneladas, durante 8 horas ininterrumpidas de permanencia de los buques en sus correspondientes atraques actuando cada uno de los oleajes ensayados.

^a Dirección, ^b Alternativa-sistema de amarre.

BARCO	DIR ^a .	ALT ^b .	MUELLE	Hs	Vai.	Der.	Gui.	Alt.	Cab.	Bal.
BULK_290	N-50°-W	14	1	4.5	2.5	1.7	0.3	0.5	0.4	1.7
		15-1	2	4.5	0.6	1.6	0.3	0.5	0.4	1.7
		15-2	2	4.5	0.5	1.3	0.3	0.5	0.4	4.4
		15-3	2	4.5	1.0	1.3	0.5	0.3	0.5	2.4
		16	3	4.5	0.8	1.6	0.3	0.4	0.4	2.0
BULK_129		14	1	4.5	0.4	0.6	0.2	0.3	0.8	2.9
		15	1	4.5	0.6	0.7	0.2	0.3	0.8	3.2

Tabla 16. Amplitudes durante 8 horas ininterrumpidas de permanencia.

BARCO	DIR ^a .	ALT ^b .	MUELLE	Hs	LPR	TPR	SPR	SPP	TPP	LPP
BULK_290	N-50°-W	14	1	4.5	17.6	36.3	15.6	14.6	29.1	16.1
		15-1	2	4.5	16.8	34.1	15.2	14.1	28.7	16.5
		15-2	2	4.5	14.4	38.7	22.4	23.5	32.5	15.0
		15-3	2	4.5	21.0	57.6	47.6	43.6	43.7	19.4
		16	3	4.5	18.0	39.6	32.9	35.5	44.1	17.5
BULK_129		14	1	4.5	9.5	12.6	11.7	13.2	16.3	8.2
		15	1	4.5	9.4	13.0	13.9	12.9	15.1	9.2

Tabla 17. Fuerzas durante 8 horas ininterrumpidas de permanencia. Amarras.

BARCO	DIR ^a	ALT ^b	MUELLE	Hs	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7
BULK_290	N-50°-W	14	1	4.5	289.4	325.4	166.8	223.8	133.1	264.5	53.3
		15-1	2	4.5	278.7	314.6	158.5	221.0	138.4	274.7	82.6
		15-2	2	4.5	115.7	323.7	138.2		138.2	306.5	13.9
		15-3	2	4.5	304.0	458.8	235.0	353.0	337.3	323.0	303.2
		16	3	4.5	244.2	360.4	107.3	270.4	286.2	253.6	217.9
BULK_129		14	1	4.5	124.9	92.7	100.4				
		15	1	4.5	136.9	87.9	101.5				

Tabla 18. Fuerzas durante 8 horas ininterrumpidas de permanencia. Defensas.

4 CONCLUSIONES.

Como conclusión general se puede decir que en todos los ataques estudiados se obtiene una inoperatividad elevada. A continuación se hace un resumen de los resultados de cada ataque estudiado.

4.1.1 Ataque del bulkcarrier de 290 m, Alternativa 14.

4.1.1.1 Condiciones de ensayo.

El bulkcarrier de 290 m a plena carga, se ha ensayado en la configuración en planta correspondiente a la alternativa 14. El sistema de amarre estaba compuesto por 8 largos, 6 traveses y 6 springs, la pretensión de las amarras fue de 8 t por línea.

4.1.1.2 Movimientos del buque.

Los movimientos máximos resultantes de la extrapolación a ocho horas ininterrumpidas de permanencia en el ataque con el oleaje ensayado, que superaron los umbrales recomendados

por el PIANC fueron la deriva (1.7 m) y el vaivén (2.5 m). El resto de los movimientos quedaron por debajo de los valores umbrales recomendados por el PIANC.

4.1.1.3 Esfuerzos en las amarras.

Todas las fuerzas máximas esperables en las amarras durante 8 horas ininterrumpidas con el oleaje ensayado quedaron por debajo de sus correspondientes cargas de trabajo.

4.1.1.4 Reacciones en las defensas.

Los resultados de los ensayos, para 8 horas ininterrumpidas del oleaje ensayado pusieron de manifiesto que la defensa 2 superaba su correspondiente carga de trabajo. El resto quedó por debajo de su carga de trabajo.

4.1.1.5 Operatividad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las frecuencias de presentación de los oleajes ensayados, el tiempo de inoperatividad es de 56 días/año.

4.1.2 Atrake del bulkcarrier de 290 m, Alternativa 15, sistema de amarre 1.

4.1.2.1 Condiciones de ensayo.

El bulkcarrier de 290 m a plena carga se ha ensayado en la configuración en planta correspondiente a la alternativa 15 con sistema de amarre 1, el cual estaba compuesto por 8 largos, 6 traveses y 6 springs, la pretensión de las amarras fue de 8 t por línea.

4.1.2.2 Movimientos del buque.

El único que supero los umbrales recomendados por el PIANC fue la deriva (1.6 m). El resto de los movimientos quedaron por debajo de los valores umbrales recomendados por el PIANC.

4.1.2.3 Esfuerzos en las amarras.

Todas las fuerzas máximas esperables en las amarras durante 8 horas ininterrumpidas con el oleaje ensayado quedan por debajo de sus correspondientes cargas de trabajo.

4.1.2.4 Reacciones en las defensas.

Los resultados de los ensayos para 8 horas ininterrumpidas del oleaje ensayado pusieron de manifiesto que la defensa 2 superaba su correspondiente carga de trabajo. El resto quedó por debajo de su carga de trabajo.

4.1.2.5 Operatividad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las frecuencias de presentación de los oleajes ensayados, el tiempo de inoperatividad obtenido es de 38 días/año.

4.1.3 Atrake del bulkcarrier de 290 m, Alternativa 15, sistema de amarre 2.

4.1.3.1 Condiciones de ensayo.

El bulkcarrier de 290 m a plena carga se ha ensayado en la configuración en planta correspondiente a la alternativa 15 con sistema de amarre 1. El sistema de amarre estaba compuesto por 8 largos, 6 traveses y 8 springs, la pretensión de las amarras fue de 8 t por línea.

4.1.3.2 Movimientos del buque.

Los movimientos máximos resultantes de la extrapolación a ocho horas ininterrumpidas de

permanencia en el atraque con el oleaje ensayado, el único que supero los umbrales recomendados por el PIANC fue la deriva (1.3 m).

4.1.3.3 Esfuerzos en las amarras.

Todas las fuerzas máximas esperables en las amarras durante 8 horas ininterrumpidas con el oleaje ensayado quedan por debajo de sus correspondientes cargas de trabajo.

4.1.3.4 Reacciones en las defensas.

Los resultados de los ensayos para 8 horas ininterrumpidas del oleaje ensayado en la configuración en planta reproducida pone de manifiesto que las defensas no alcanzan su correspondiente carga de trabajo.

4.1.3.5 Operatividad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las frecuencias de presentación de los oleajes ensayados, los tiempos de inoperatividad obtenidos son de 21 días/año.

4.1.4 Atraque del bulkcarrier de 290 m, Alternativa 15, sistema de amarre 3.

4.1.4.1 Condiciones de ensayo.

El bulkcarrier de 290 m a plena carga se ha ensayado en la configuración en planta correspondiente a la alternativa 15 con sistema de amarre 1. El sistema de amarre estaba compuesto por 8 largos, 10 traveses y 6 springs, la pretensión de las amarras fue de 8 t por línea.

4.1.4.2 Movimientos del buque.

Los movimientos máximos resultantes de la extrapolación a ocho horas ininterrumpidas de permanencia en el atraque con el oleaje ensayado, el único que supero los umbrales recomendados por el PIANC fue la deriva (1.3 m). El resto de los movimientos quedaron por debajo de los valores umbrales recomendados por el PIANC.

4.1.4.3 Esfuerzos en las amarras.

Todas las fuerzas máximas esperables en las amarras durante 8 horas ininterrumpidas con el oleaje ensayado quedaron por debajo de sus correspondientes cargas de trabajo.

4.1.4.4 Reacciones en las defensas.

Los resultados de los ensayos para 8 horas ininterrumpidas del oleaje ensayado en la configuración en planta reproducida pone de manifiesto que las defensas no alcanzaron su correspondiente carga de trabajo.

4.1.4.5 Operatividad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las frecuencias de presentación de los oleajes ensayados, los tiempos de inoperatividad obtenidos son de 36 días/año.

4.1.5 Atraque del bulkcarrier de 290 m, Alternativa 16.

4.1.5.1 Condiciones de ensayo.

El bulkcarrier de 290 m a plena carga se ha ensayado en la configuración en planta correspondiente a la alternativa 16 (figura 1). El sistema de amarre estaba compuesto por 8 largos, 6 traveses y 8 springs, la pretensión de las amarras fue de 8 t por línea.

4.1.5.2 Movimientos del buque.

Los movimientos máximos resultantes de la extrapolación a ocho horas ininterrumpidas de permanencia en el atraque con el oleaje ensayado, el único que supero los umbrales recomendados por el PIANC fué la deriva (1.6 m). El resto de los movimientos quedaron por debajo de los valores umbrales recomendados por el PIANC.

4.1.5.3 Esfuerzos en las amarras.

Todas las fuerzas máximas esperables en las amarras durante 8 horas ininterrumpidas con el oleaje ensayado quedan por debajo de sus correspondientes cargas de trabajo.

4.1.5.4 Reacciones en las defensas.

Los resultados de los ensayos para 8 horas ininterrumpidas del oleaje ensayado en la configuración en planta reproducida pone de manifiesto que las defensas no alcanzan su correspondiente carga de trabajo.

4.1.5.5 Operatividad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las frecuencias de presentación de los oleajes ensayados, los tiempos de inoperatividad obtenidos son de 57 días/año.

4.1.6 Atraque del bulkcarrier de 129 m alternativa 14.

4.1.6.1 Condiciones de ensayo.

El bulkcarrier de 129 m a plena carga se ha ensayado en la configuración en planta correspondiente a la alternativa 14. El sistema de amarre estaba compuesto por 8 largos, 6 traveses y 8 springs, la pretensión de las amarras fue de 8 t por línea.

4.1.6.2 Movimientos del buque.

Los movimientos máximos resultantes de la extrapolación a ocho horas ininterrumpidas de permanencia en el atraque con el oleaje ensayado, no se superaron los umbrales recomendados por el PIANC, la deriva con (0.6 m), fue el que más se aproximó. El resto de los movimientos quedaron claramente por debajo de los valores umbrales recomendados por el PIANC.

4.1.6.3 Esfuerzos en las amarras.

Todas las fuerzas máximas esperables en las amarras durante 8 horas ininterrumpidas con el oleaje ensayado quedaron por debajo de sus correspondientes cargas de trabajo.

4.1.6.4 Reacciones en las defensas.

Los resultados de los ensayos para 8 horas ininterrumpidas del oleaje ensayado en la configuración en planta reproducida pone de manifiesto que las defensas no alcanzan su correspondiente carga de trabajo.

4.1.6.5 Operatividad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las frecuencias de presentación de los oleajes ensayados, los tiempos de inoperatividad obtenidos son de 5 días/año.

4.1.7 Atraque del bulkcarrier de 129 m alternativa 15.

4.1.7.1 Condiciones de ensayo.

El bulkcarrier de 129 m a plena carga se ha ensayado en la configuración en planta correspondiente a la alternativa 15. El sistema de amarre estaba compuesto por 8 largos, 6 traveses y 8 springs, la pretensión de las amarras fue de 8 t por línea.

4.1.7.2 Movimientos del buque.

Los movimientos máximos resultantes de la extrapolación a ocho horas ininterrumpidas de permanencia en el atraque con el oleaje ensayado, no se superaron los umbrales recomendados por el PIANC, la deriva con (0.7 m), fue el que más se aproximó. El resto de los movimientos quedaron claramente por debajo de los valores umbrales recomendados por el PIANC.

4.1.7.3 Esfuerzos en las amarras.

Todas las fuerzas máximas esperables en las amarras durante 8 horas ininterrumpidas con el oleaje ensayado quedan por debajo de sus correspondientes cargas de trabajo.

4.1.7.4 Reacciones en las defensas.

Los ensayos para 8 horas ininterrumpidas del oleaje ensayado en la configuración en planta reproducida pone de manifiesto que las defensas no alcanzan su correspondiente carga de trabajo.

4.1.7.5 Operatividad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las frecuencias de presentación de los oleajes ensayados, los tiempos de inoperatividad obtenidos son de 11 días/año.

5 BIBLIOGRAFÍA.

Análisis crítico de los sistemas de atraque de buques. Gregorio Gómez Pina, Ramón Iribarren Alonso.

Criteria for movements of moored ships in harbours. PIANC. Report of Working Group 24. Supplement to Bolletín 88, 1995.

Guidelines and recommendations for the safe mooring of large ships at ports and sea islands. London. Oil Companies International Marine Forum (OCIMF).

Research Investigation for the improvement of ship mooring methods. British Ship Research Association (BSRA). Reports Ns. 179, 256, 304, 386.

Models in Hydraulic engineering. Physical principles and Design Applications. P. Novak, J. Cábelka

Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Steven A. Hughes.